第41卷 第3期
2024年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 41 No. 3
Mar. 2024

DOI:10.13866/j.azr.2024.03.01

三江源一次降水过程雨滴谱垂直演变特征

郭世钰[1,2]， 张玉欣[1,2]， 韩辉邦[1,2]， 周万福[1,2]， 康晓燕[1,2]， 张莉燕[1,2]
（1. 青海省气象灾害防御技术中心,青海 西宁 810001；2. 青海省防灾减灾重点实验室,青海 西宁 810001）

摘 要： 利用布设在泽库站内的微雨雷达（Micro Rain Radar,MRR）、OTT-PARSIVEL激光雨滴谱仪、雨量计（Rain Gauge,RG）观测资料,针对2021年9月17日一次降水天气过程,对比分析MRR在高原地区的适用性,研究了不同雨强MRR观测参量及雨滴谱的垂直变化特征。结果表明:在此次过程中MRR与雨滴谱仪及RG的累计雨量结果较为一致,MRR 200 m雨强与雨滴谱仪反演值相关性较好。不同雨强下降水参量在垂直分布上有所差异,雨强Ⅰ档,受蒸发作用影响反射率因子、液态水含量、雨强由高层至低层表现出波动变化的趋势;雨强Ⅱ档,蒸发作用减弱,各微物理量峰值高度有所降低;雨强Ⅲ档,粒子碰并作用增强直径增大,各微物理量随高度的降低而增大。此次降水过程以小粒子为主,在各个高度层小粒子对数浓度的贡献均最大。1000~4000 m小粒子对雨强贡献率均大于90%;1000 m以下中等粒子随着高度降低对雨强的贡献逐渐增大;大粒子在高层对雨强的贡献率大于低层。

关键词： 三江源；微雨雷达；雨滴谱；垂直分布

雨滴谱是雨滴数浓度随雨滴尺度变化的函数,是研究降水过程微观变化的重要参考。1948年Marshall和Palmer[1]通过对收集的染色滤纸上的渥太华夏季降水雨滴进行测量,开启了对雨滴谱的研究。我国雨滴谱观测研究始于20世纪60年代,中国科学院地球物理研究所在衡山和泰山对当地的降水特征及滴谱进行观测研究[2]。雨滴谱在降水形成机制[3]、雷达定量估测降水[4]、人工增雨作业效果评估[5]及改进数值预报模式微物理参数化方案[6]等方面具有重要意义。

不同地区的气候、地形及降水对雨滴谱分布影响明显。Smith等[7]研究了2006年5—10月Princeton强降水时的雨滴谱分布特征,进而利用随机模型分析雨强的变化情况。Maki等[8]分析了澳大利亚典型大陆飑线过程下的雨滴谱分布特征,发现对流中心和层状云区的雨滴谱特征具有明显差异。赵城城等[9]研究北京山区与平原地区夏季雨滴谱特征后发现北京对流云及层状云滴谱均表现为单峰结构,平原地区的滴谱数浓度大于山区。柳臣中等[10]发现成都地区积云、积层混合云降水的雨滴谱都比层状云降水宽,雨滴数密度也大于层状云降水,小雨滴对层状云降水雨强贡献大,大雨滴对积云、积层混合云贡献较大。研究高原雨滴谱对认识高原降水特征具有重要意义。李山山等[11]研究青藏高原东坡不同高度的雨滴谱发现雨滴平均谱符合Gamma分布,雨强不同雨滴谱也存在较大差异。于建宇等[12]研究发现那曲地区层状云谱宽较窄,积雨云和混合云谱宽较宽,1~2 mm雨滴对层状云雨强贡献最大。张玉欣等[13]发现祁连山南麓层状云降水谱宽较窄,对流云降水谱宽更宽,Gamma分布的拟合效果更好。雨滴谱特征除横向的局地性差异外,纵向上的垂直分布在地形、相态变化及垂直气流等因素的影响下会产生一定差异,对雨滴谱垂直变化特征研究具有重要意义,但在高原地区这方面的研究相对缺乏。基于雨滴谱仪研究雨滴谱分布特征已经形成一套较为成熟的研究方法,但单站的雨滴谱仪无法观测垂直雨滴谱变化情况。Chen等[14]利用架设在深圳的356 m气象塔,分别在4个高度上安装雨滴

收稿日期： 2023-07-03； **修订日期：** 2023-12-15
基金项目： 第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0104）;国家自然科学基金（42165008）;青海省科技厅研究项目（2021-ZJ-T04）;青海省气象局重点项目（QXZD2022-13）
作者简介： 郭世钰（1997-）,男,助理工程师,主要从事人工影响天气相关技术研究. E-mail: 13327695665@163.com
通讯作者： 张玉欣. E-mail: nuistzyx@126.com

谱仪研究两次台风过程中不同高度雨滴谱的分布特征，研究发现不同高度雨滴谱变化特征存在差异，低层中型雨滴较多，雨滴谱低层比高层窄。陈聪等[15]对比研究黄山不同高度雨滴谱分布发现小于1 mm雨滴数浓度在山顶最大山底最小，大于1.5 mm雨滴数浓度在山腰最大，山底最小。不同高度的雨滴谱具有明显差异且存在局地性，但在不同高度布设雨滴谱仪成本较高，空间分辨率较低，而MRR作为一种兼具易安装、易维护、低成本、可无人值守、可对雨滴谱垂直特征实现连续观测的小型仪器，成为研究滴谱垂直特征的重要工具[16]。

本文拟利用2021年9月17日一次层状云降水天气过程的MRR、OTT-PARSIVEL雨滴谱仪（以下简称雨滴谱仪）及RG观测数据，判断MRR在三江源地区的可靠性，并利用MRR数据分析降水过程中云微物理参量在不同高度的变化特征，及不同大小雨滴粒子对数浓度和雨强的贡献程度，揭示三江源地区降水雨滴谱分布及云微物理特征的垂直变化情况。

1 仪器与方法

1.1 仪器

本文使用2021年9月17日MRR、雨滴谱仪及RG观测数据，三种设备均布设在青海省黄南藏族自治州泽库县（101º28′N，35º2′E），海拔3662 m，仪器之间的距离不超过20 m。激光雨滴谱仪测量范围0.2~25 mm，测量速度范围0.2~20 m·s^{-1}，采样频率1 min。观测使用的MRR是垂直指向的调频连续波K波段雷达，能探测垂直方向上的31个距离库，最小高度分辨率为10 m，最小时间分辨率为10 s，此次试验预设的垂直分辨率为200 m，时间分辨率1 min，最大垂直探测高度距地6200 m。

1.2 降水参数反演算法

MRR原始数据中输出了包括雷达反射率因子Z（dBZ）、雨强R（mm·h^{-1}）、液态水含量LWC（g·m^{-3}）、粒子下落速度W（m·s^{-1}）、粒子直径D（mm）等参数。MRR利用粒子下落速度与直径的经验公式（1）进而能够反演得到不同高度上的雨滴谱：

$$D(v)=\frac{1}{0.6}\ln\frac{10.3}{9.65-v/\delta(h)} \quad (1)$$

式中：$D(v)$为雨滴粒子直径（mm）；$\delta(h)$为高度h处的空气密度修正因子；v为雨滴粒子处在静止大气中的下落末速度（m·s^{-1}），即假设雨滴处在静止大气中，垂直气流速度w为0（下沉气流为正，上升气流为负），但实际发生降水时雨滴下落过程中除受重力外还受到垂直气流的影响，导致MRR观测的垂直下落速度包含了雨滴粒子在静止大气中的下落速度及垂直气流速度，即$v+w$，则公式（1）可变为公式（2）：

$$D(v)=\frac{1}{0.6}\ln\frac{10.3}{9.65-(v+w)/\delta(h)} \quad (2)$$

式中：w为垂直气流速度（m·s^{-1}），随着高度的降低，空气密度逐渐增大，需要利用粒子下落末速度求取粒子直径时对高度进行修正：

$$\delta(h)=1+3.68+10^{-5}h+1.71\times10^{-9}h^2 \quad (3)$$

根据公式（2）可知，下沉气流会使雨滴下落速度偏大，从而导致反演的雨滴直径偏大；上升气流使得雨滴下落速度偏小，使反演的雨滴直径偏小。由王洪等[16]的研究可知不同速度大小的垂直气流对雨滴数浓度及降水参数的影响不同，下沉气流使得大粒子数浓度增大，小粒子数浓度减小；上升气流则相反；下沉气流在影响雨滴直径的同时也使反射率因子、液态水含量、雨强出现不同程度增大。为能获得更加准确的降水参数，对垂直气流的剔除十分必要。目前已有的计算雷达观测垂直气流的方法有罗杰斯法[17]、三参量法[18]、速度三阶中心矩法[19]、速度谱低端法[20]等。本文采用速度谱低端法剔除垂直气流对粒子下落速度的影响，进而反演得到粒子数浓度$N(D)$，再利用$N(D)$计算得到反射率因子、液态水含量、雨强、有效直径ED（mm），公式如下：

$$Z=\sum N(D)D^6\Delta D \quad (4)$$

$$LWC=\rho_w\sum N(D)D^3\Delta D \quad (5)$$

$$R=6\pi10^{-4}\sum N(D)D^3V(D)\Delta D \quad (6)$$

$$ED=\frac{\sum N(D)D^3\Delta D}{\sum N(D)D^2\Delta D} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 天气形势

2021年9月17日18:00，500 hPa天气（图略）中，欧亚大陆表现为“两脊一槽”的环流形势，新疆北部受低涡控制，贝加尔湖位于高压脊前。青海地区高原低涡较为活跃，测站处在高原低涡槽前，西南风输送稳定的暖湿气流，9月17日18:30测站开始出现

降水，根据地面雨滴谱仪的观测，测站降水持续时段为18:42—23:59，平均强度0.54 mm·h⁻¹。此次程为一次典型层状云小雨过程，对研究三江源地区弱降水过程下的滴谱垂直演变特征具有参考意义。

2.2 仪器观测结果对比

此次降水时段选取MRR近地面200 m、400 m的半小时累计雨量，雨滴谱仪及RG的观测数据进行对比（图1）。MRR 200 m半小时累计雨量与雨滴谱仪和RG变化趋势一致，与平原地区[21]观测结果一致。MRR 400 m半小时累计雨量在19:30和24:00时与雨滴谱仪和RG均有明显的降水峰值出现，但强度偏大1 mm以上，推测由于测站位于三江源地区地形复杂，降水更易受到地形抬升影响[22]，易出现上升气流使雨滴在较高层碰并增长，从而导致较高层观测结果大于低层。

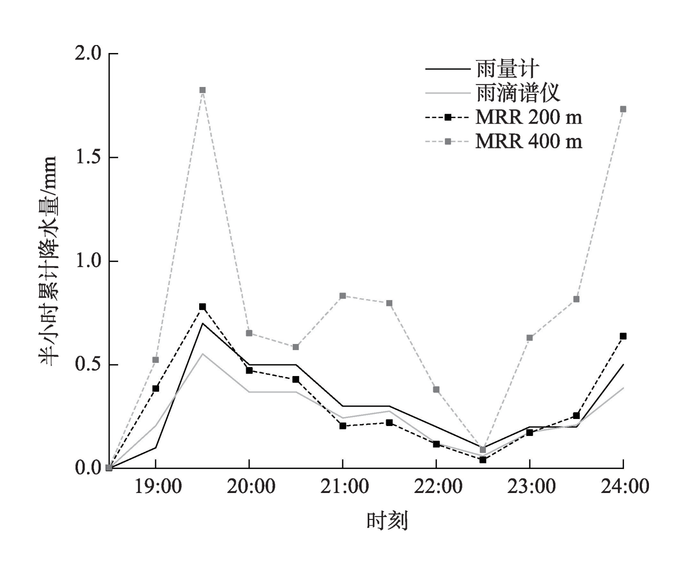


图1　三种仪器半小时累计降水量变化

Fig. 1　Variations in half-hour cumulative precipitation from three different types of instruments

对降水期间MRR 200 m的雨强与雨滴谱仪雨强做线性拟合（图2a）发现MRR 200 m反演雨强高于雨滴谱仪。从拟合情况来看，MRR 200 m雨强与雨滴谱仪反演值具有较好的相关性，公式中的决定系数为0.88，斜率为1.44，MRR雨强偏高于雨滴谱仪，当雨强低于0.8 mm·h⁻¹时，MRR 200 m高度层雨强的观测结果与雨滴谱仪更为接近。因RG分辨率较低未将MRR与RG做拟合对比。MRR 200 m与地面雨滴谱仪的平均雨滴谱相比（图2b），0.5 mm粒径以下MRR观测数浓度明显大于雨滴谱仪，两种仪器在0.5~1 mm粒子段观测数浓度基本一致，1 mm以上粒子段MRR 200 m观测数浓度略大于雨滴谱仪。

通过对比研究发现，MRR在三江源区具有一定的降水观测能力，其中200 m的观测结果能很好地反映地面实际的降水情况，但对于大雨的观测可靠性还需进一步的研究验证。

2.3 降水垂直结构分析

为研究MRR在不同雨强下各参量及雨滴谱的垂直变化特征，参考Peters等[23]的雨强分档，利用雨滴谱仪观测结果将雨强划分为Ⅰ档（0.1 mm·h⁻¹<R≤0.2 mm·h⁻¹）、Ⅱ档（0.2 mm·h⁻¹<R≤1 mm·h⁻¹）和Ⅲ档（R>1 mm·h⁻¹）（图3）。降水发生前（18:30）反射率因子、液态水含量、雨强、数浓度（取对数值）的高值区位于3500 m，此时MRR观测位置正上方云层中出现覆盖范围较小的对流云，反射率因子达35 dBZ，雨强在30 mm·h⁻¹以上，液态水含量大于15 g·m⁻³；1000 m高度以下液态水含量为0，低层较为干燥。18:40分

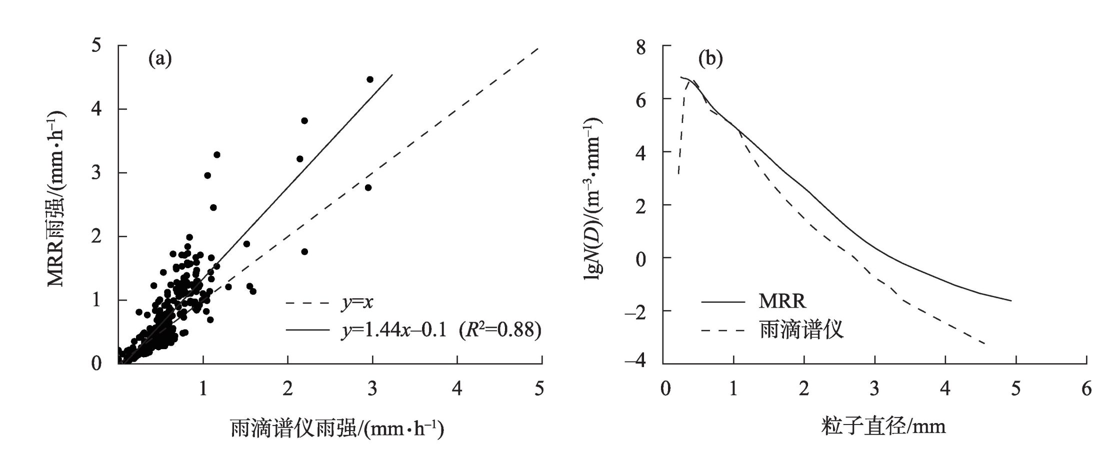


图2　MRR 200 m高度和雨滴谱仪观测雨强（a）及平均雨滴谱对比（b）

Fig. 2　Comparison of MRR 200 m height and raindrop spectrometer observation of rain rate (a) and average raindrop spectrum (b)

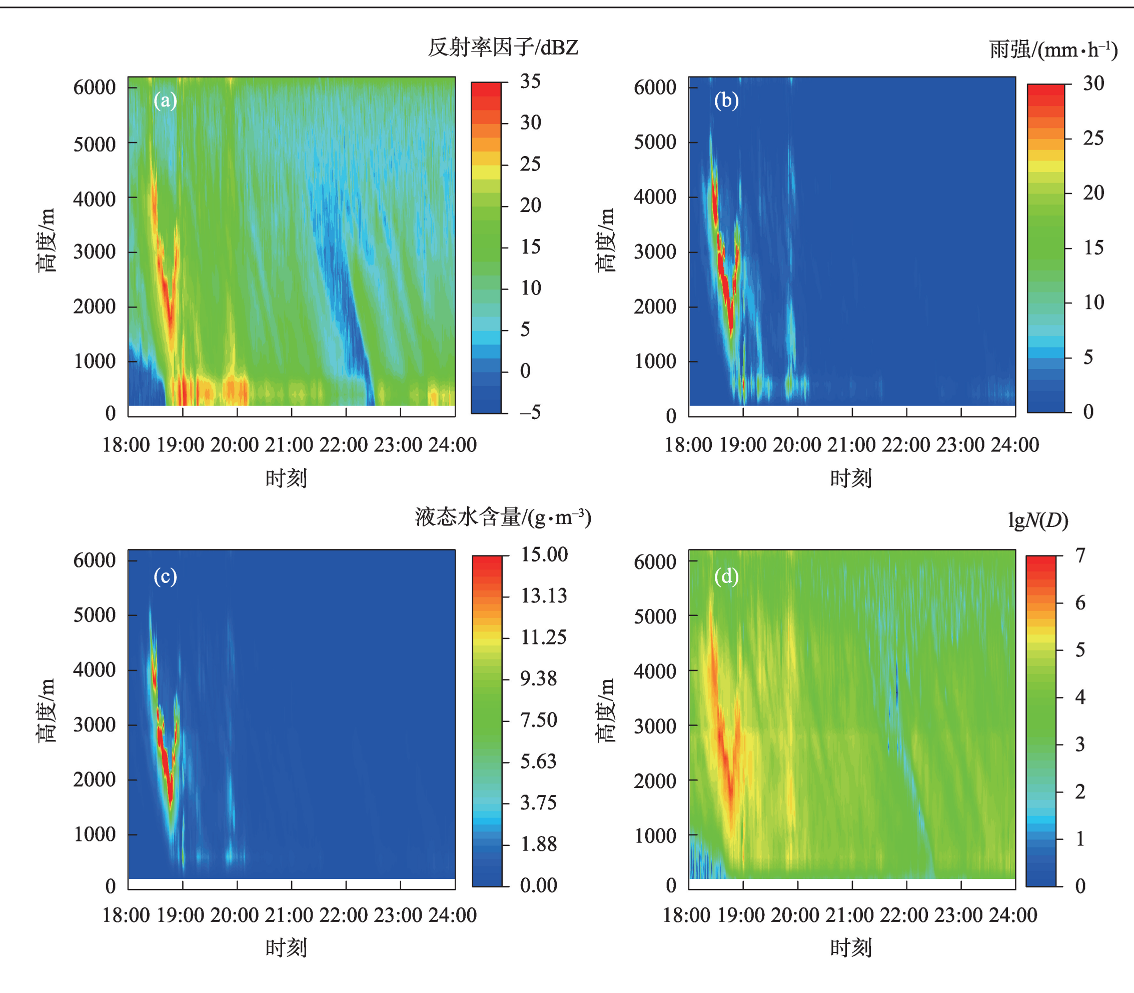


图3　MRR反射率因子(a)、雨强(b)、液态水含量(c)、粒子数浓度(d)随时间和高度的变化特征

Fig. 3　Time-height sections of reflectivity (a), rain rate (b), liquid water content (c), particle number concentration (d) of MRR

左右，强中心降至1500 m，随降水开始，反射率因子、液态水含量、雨强、数浓度的高值区逐渐降低，1500~3000 m再次出现强中心。18:42地面开始出现降水，200~800 m，反射率因子从0~5 dBZ增大至20~35 dBZ。雨强从0增大至20 mm·h^{-1}，液态水含量从0增大至10 g·m^{-3}。19:00—20:20高层强中心消失，降水过程以层状云降水为主，200~1000 m，雨强在10~15 mm·h^{-1}之间变化，液态水含量在1.5~3.5 g·m^{-3}之间变化，在此时段内，累计雨量出现最大值。20:20之后各参量逐渐减弱，降水过程进入末期。

三档不同雨强下反射率因子、液态水含量、雨强、有效直径平均值垂直分布情况有所不同(图4)。随着雨强的增大，除有效直径外各物理量随雨强增大，变化趋势基本一致。Ⅰ档集中在降水初期和中后期，随高度的降低，反射率因子在500 m存在峰值呈单峰型，液态水含量和雨强在2400 m和500 m存在峰值呈多峰型。在2400 m以下，反射率因子表现为先减小后在1000 m附近快速增大，雨强、液态水含量在1000~2400 m之间也存在明显减小，表明在此高度层之间存在明显干层蒸发作用较强，1000 m高度以下小粒子在碰并作用影响下逐渐长大，反射率因子作为高阶矩量对粒子增长较为敏感，增大程度强于其他参量，物理量整体表现为波动变化。

Ⅱ档雨强集中在降水中期和末期，反射率表现出先减小后在低层明显增大，与Ⅰ档雨强下的反射率因子存在明显差异，在降水的持续影响下1000~2400 m的干层逐渐转变为湿层蒸发作用减弱，反射率因子在该层表现出缓慢增大的趋势。液态水含量、雨强的整体变化趋势与Ⅰ档相似，因雨强的增大各参量均有所增大，有所不同的是雨强、液态水含量的峰值出现在1900 m附近，相较于Ⅰ档峰值高度下降约500 m左右，再次证明由于该时段前期已出现降水，近地面环境湿度有所上升，雨滴在近地

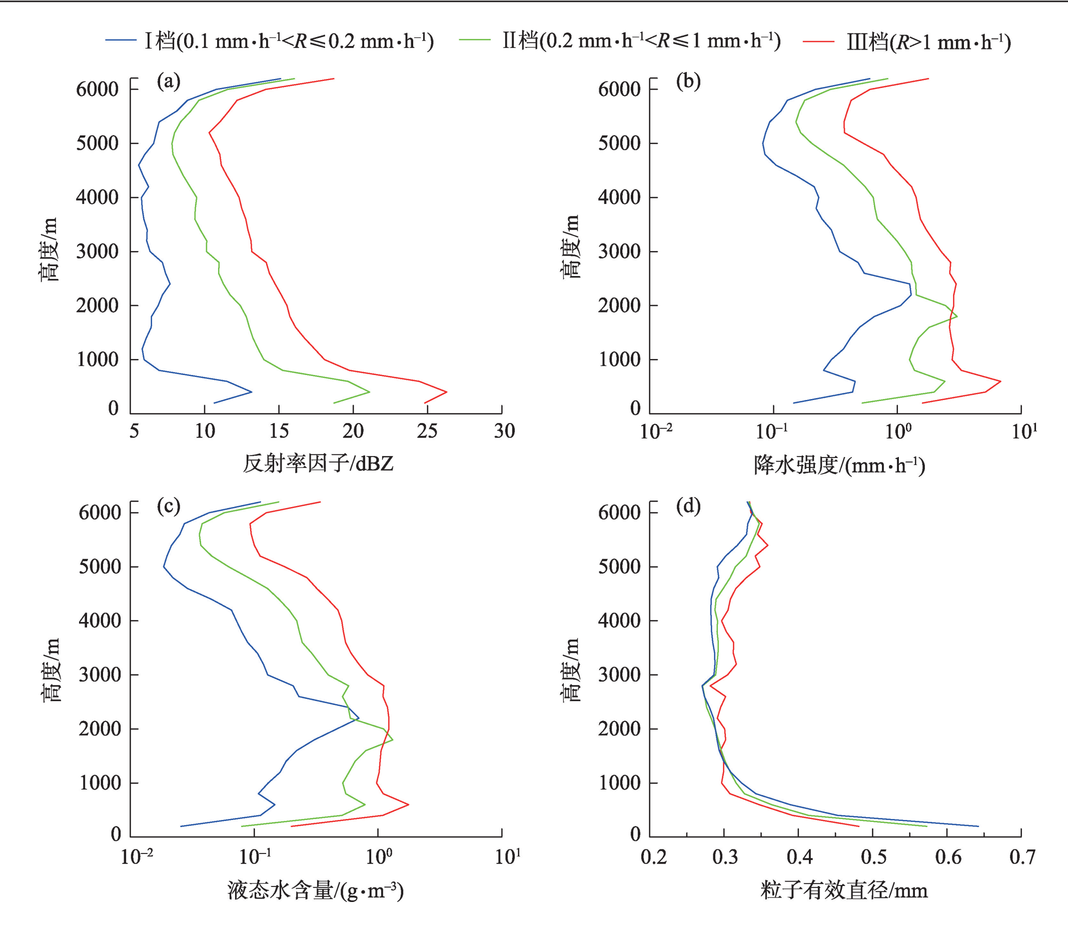


图4　不同档雨强下MRR的平均反射率因子(a)、雨强(b)、液态水含量(c)、粒子有效直径(d)的垂直分布

Fig. 4　The vertical distributions of average reflectivity (a), rain rate (b), liquid water content (c) and effective diameter (d) of MRR at different stages rain rate

面附近的蒸发作用减弱。

Ⅲ档雨强主要集中在降水前期和中期，为整个过程降水最强的阶段，各参量也达到最大，反射率因子变化趋势与Ⅱ档相似，雨强和液态水含量在中层未出现明显峰值，由于此时段雨强较大，雨滴碰并概率增大，随着碰并作用加强导致粒子直径增大，碰并作用影响超过蒸发作用，使得由高层至低层各参量整体呈增大趋势。

三档不同雨强下的有效直径变化趋势基本一致(图4d)，有效直径整体保持在较小水平，且随高度降低逐渐增大，崔云扬等[21]在河北地区的研究表明在一次对流较弱的混合云降水过程中有效直径在0.6~1.5 mm，总体呈现自高到低逐渐增大，与本次过程的研究结果一致。本研究中整体粒子较小，由于低空碰并作用导致有效直径开始明显增大。

图5为MRR反演的200～2000 m共10层的平均雨滴谱，雨滴谱均为单峰型，峰值浓度随着高度的降低而降低，2000 m的峰值浓度最大，200 m的最小，各高度层的峰值直径在0.3 mm左右，这与张玉欣等[24]在三江源地区的研究结果相同。这段高度层的谱宽在4.9~5.2 mm，小粒子集中在高层，降落

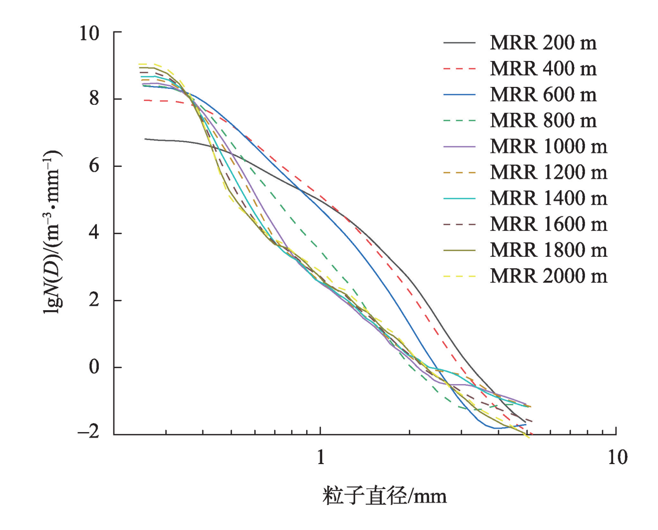


图5　MRR 200~2000 m的10个高度层的平均谱型

Fig. 5　The average raindrop spectrum of MRR 200−2000 m in ten layers

过程中随着碰并增长导致低层小粒子浓度较低，1000 m以上的高度层随着粒子直径的增大，数浓度迅速减小。

为进一步了解此次过程中平均雨滴谱垂直分布在不同雨强下的变化情况，对三档不同雨强下的雨滴谱特征进行分析。图6为不同档雨强下MRR平均雨滴谱垂直分布特征，Ⅰ档时(图6a)，谱宽峰值区在600~2000 m，小于0.5 mm的小粒子主要集中在1100~3000 m，此阶段雨强较小且低层较为干燥受蒸发作用影响，小粒子在低层浓度峰值区较窄。1 mm以上粒子在3000 m以下分布较不均匀，对比图4d的有效直径，800 m以下各直径粒子均有所增多；3000 m以上粒子数浓度随高度的变化不明显；由于雨强较小碰并作用较弱，大粒子数浓度在各高度上都保持较低水平。Ⅱ档时(图6b)，雨强增大，低层蒸发作用减弱，小于0.5 mm的小粒子数浓度增大明显，峰值区集中在500~3000 m；大于1 mm粒子在1000 m以上随高变化不明显，1000 m以下浓度增大，推测由于小粒子碰并作用使大粒子增多。Ⅲ档时(图6c)，随着雨强增大，小于2 mm的粒子浓度分布与Ⅱ档基本一致，但在1000~2000 m及200~800 m，大于2 mm粒子高浓度区变宽，Ⅲ档降水在该高度对整个过程雨滴谱垂直分布有明显影响，由于Ⅲ档样本集中在降水初期及末期，降水前期2000~4000 m存在强回波区，而降水开始后强回波区下降到2000 m以下(图3a)导致低层2 mm以上粒子高浓度区明显变宽，降水前期较高云中的大粒子对下层云粒子有播撒作用，800 m附近粒子破碎，2 mm以上粒子明显减少。整个过程的平均雨滴谱垂直分布(图6d)在2 mm以下与Ⅱ、Ⅲ档的分布基本一致，小于0.5 mm的小粒子数浓度最大值出现在1400~3000 m高度，1000 m以下浓度明显增大；0.5~2 mm粒子平均雨滴谱垂直分布与Ⅱ档相似，2 mm以上分布受Ⅲ档雨强阶段的影响较为明显，1000~2000 m表现出粒子数浓度的明显增大。

2.4 雨滴对数浓度和雨强的贡献率垂直分布

为了解此次过程中MRR观测的不同尺度的雨滴粒子在不同雨强下对雨强、对数浓度的贡献情况

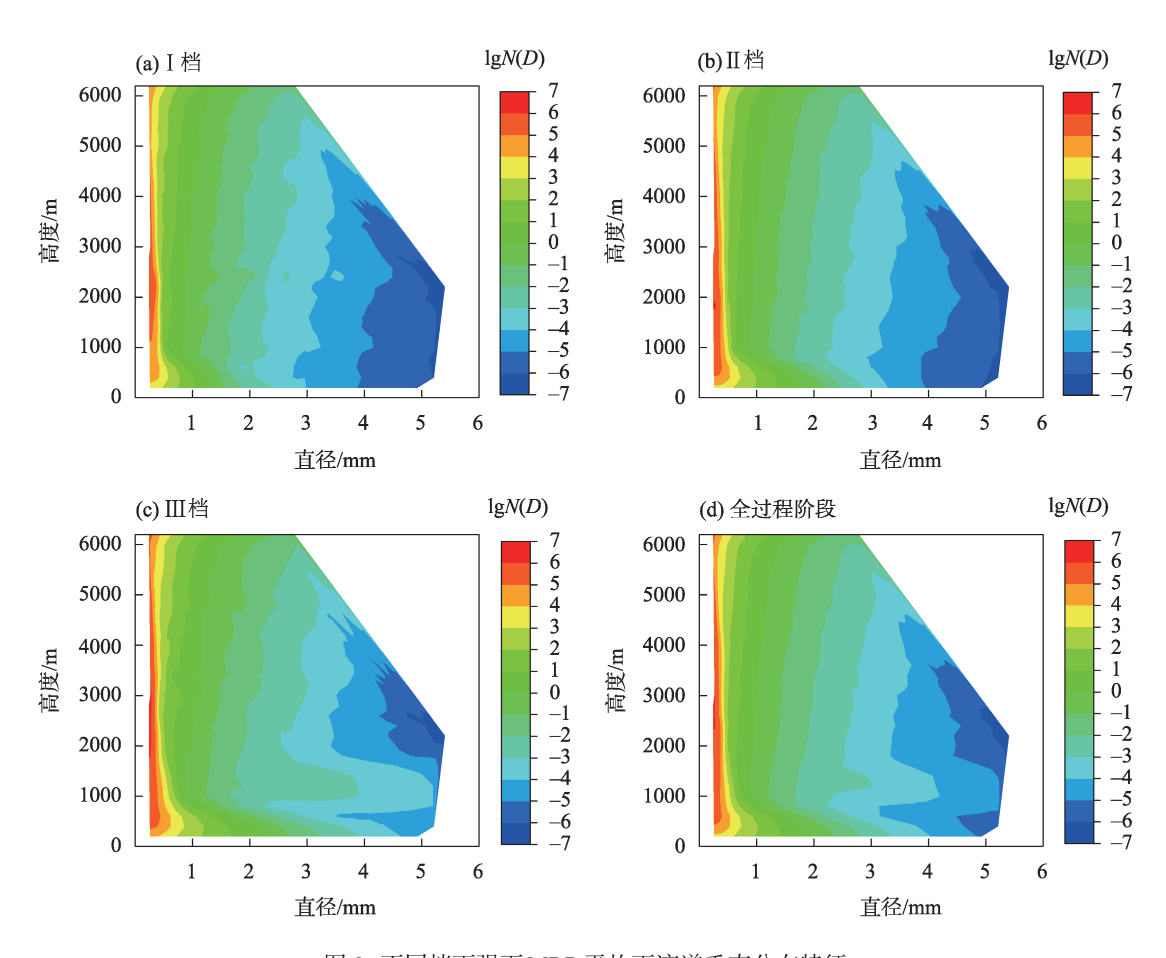


图6 不同档雨强下MRR平均雨滴谱垂直分布特征

Fig. 6 The vertical distribution characteristics of the MRR average raindrop spectrum at different rain rate

(图7)，参考宋灿等[25]、仝泽鹏等[26]雨滴分档将雨滴分为小粒子(0 mm<D≤0.5 mm)、次小粒子(0.5 mm<D≤1 mm)、中等粒子(1 mm<D≤3 mm)和粒子(D>3 mm)四个等级。在三档不同雨强下，各个高度层小粒子对数浓度的贡献都最大，且随高度降低占比减小，对比图6d和图4d结果一致。在1000 m以下次小粒子对数浓度的贡献随雨强增大而增大，贡献率在11.2%~16.7%，贡献率最大值出现在200 m高度层，中等和大粒子对数浓度的贡献均不明显。三档不同雨强下，对雨强的贡献整体相似，在1000~4000 m高度小粒子贡献率均大于90%；1000 m以下次小粒子及中等粒子随着高度降低对雨强的贡献逐渐增大，对雨强贡献最大值出现在200 m高度层分别为56.9%和46.2%。次小粒子以下随着雨强增大，对雨强的贡献逐渐减小，中等及大粒子对雨强的贡献逐渐增大。大粒子在高层贡献率大于低层。马思敏等[27]研究六盘山区不同云系条件下的雨滴谱特征发现该地区层状云降水小雨滴对雨强和数浓度的贡献均为最大。宋灿等[25]研究发现邢台地区层状云在MRR所有观测高度上小于0.5 mm的小粒子对数浓度贡献最大，对雨强的贡献方面1 mm以上的粒子对雨强的贡献很大，而1 mm以下的粒子贡献占比小。仝泽鹏等[26]伊宁地区一次大雨过程中，小雨滴平均数浓度占总数浓度90%以上，且随高度降低逐渐减小，1 mm以上的中雨滴对雨强贡献最大，大于3 mm的大雨滴贡献最小。在对数浓度贡献方面的结论与本文的研究结果一致，但本研究中0.5 mm以下的小粒子比1 mm以上的粒子对雨强贡献更大，与高原地形复杂，降水过程较弱有关。

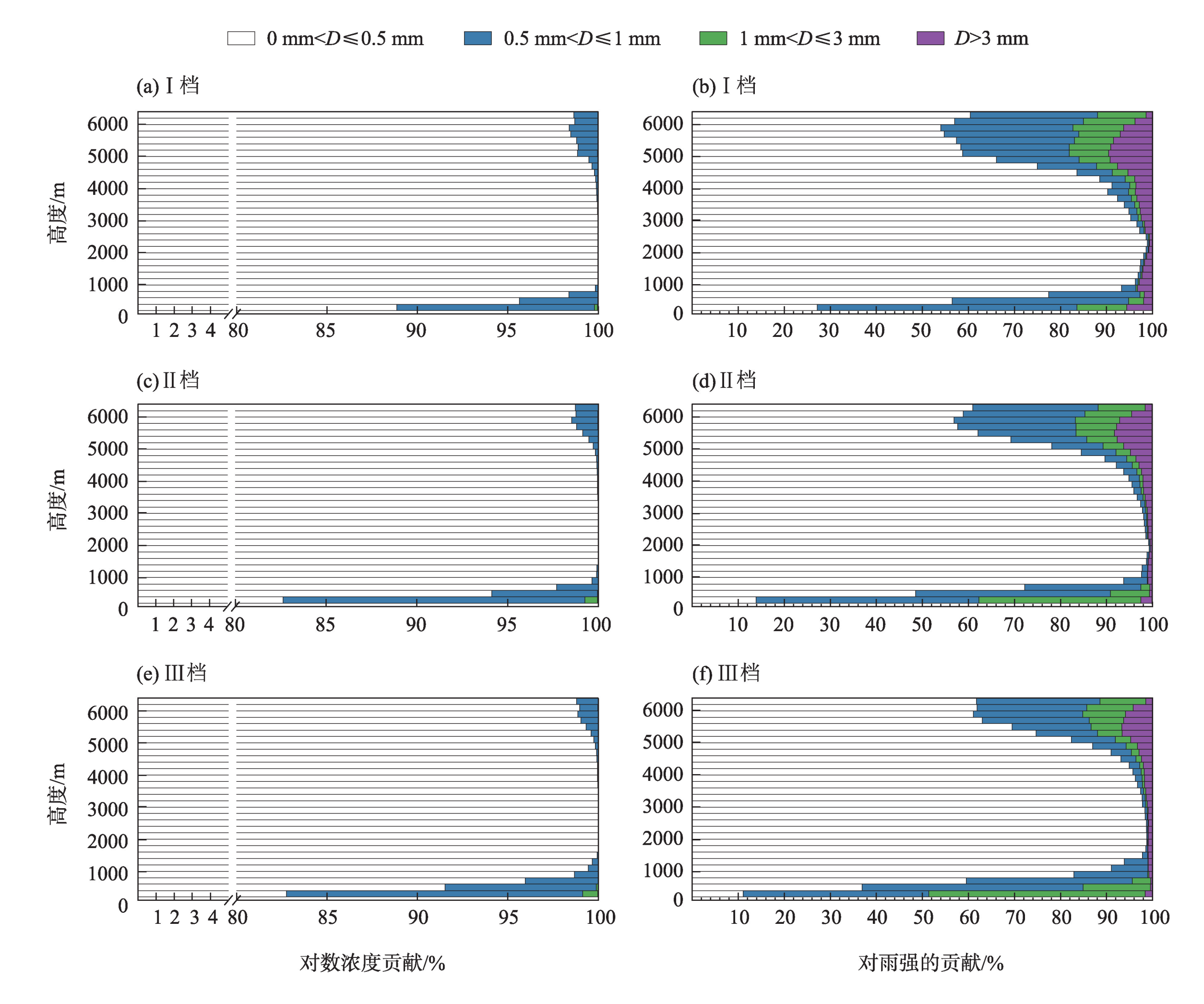


图7　不同尺度雨滴在不同档雨强下对数浓度(a、c、e)和雨强的贡献率(b、d、f)

Fig. 7　The percentages of raindrops number concentration (a, c, e) with different diameters to total number concentration and rain rate (b, d, f) at different rain rate

3 结 论

本文使用2021年9月17日在泽库县的MRR、雨滴谱仪及RG观测资料，对比了三种设备在一次降水过程中的观测能力，分析降水过程中利用MRR观测的降水参量的垂直变化情况及雨滴谱分布特征，得出以下结论：

（1）此次过程中MRR、雨滴谱仪及RG的半小时累计雨量变化具有相似的趋势，MRR 200 m观测雨强与雨滴谱仪反演值具有较好的相关性，MRR在三江源区具有较好的降水观测能力，其中200 m的观测结果能很好的反映地面实际的降水情况。

（2）在Ⅰ档雨强时降水处在初期，低层较为干燥，蒸发作用明显，反射率因子、液态水含量、雨强表现出先增大后减小在近地面又增大的波动变化趋势，小粒子在低层浓度峰值区较窄，大粒子在整层高度上数浓度均保持较低水平。Ⅱ档雨强时近地面环境湿度上升，近地面附近的蒸发作用减弱，各物理量峰值高度有所降低，0.5 mm以下小粒子数浓度增大明显，碰并作用使得1000 m以下高浓度区变宽。Ⅲ档时碰并作用加强，粒子直径增大，碰并作用影响超过蒸发作用，高层至低层各参量整体呈增大趋势；1000~2000 m，2 mm以上粒子高浓度区变宽，降水前期高层云中的大粒子对下层云粒子有播撒作用，800 m附近降水粒子开始破碎，变成更小的粒子，2 mm以上粒子浓度明显减小。

（3）在三档不同雨强下，在各高度层小粒子对数浓度的贡献都最大。在1000 m以下次小粒子对数浓度的贡献随雨强增大而增大，中等和大粒子对数浓度的贡献均不明显。三档不同雨强下，对雨强的贡献整体相似，在1000~4000 m高度小粒子贡献率均大于90%；1000 m以下除小粒子外均随着高度降低对雨强的贡献增大；1 mm以下的小粒子随着雨强增大，对雨强的贡献逐渐减小，大于1 mm的粒子对雨强的贡献逐渐增大；大粒子在高层贡献率大于低层。

参考文献(References)：

[1] Marshall J S, Palmer W M. The distribution of raindrops with size [J]. Journal of Meteorology, 1948, 5(4): 165–166.

[2] 朱珍华. 我国云雾降水微物理特征的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 30–40. [Zhu Zhenhua. Study of Cloud Precipitation Microphysical Characteristics in China[M]. Beijing: Science Press, 1965: 30–40.]

[3] 李欣, 张璐. 北上台风强降水形成机制及微物理特征[J]. 应用气象学报, 2022, 33(1): 29–42. [Li Xin, Zhang Lu. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoons[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(1): 29–42.]

[4] 吴亚昊, 刘黎平, 周筠珺, 等. 雨滴谱的变化对降水估测的影响研究[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 220–230. [Wu Yahao, Liu Liping, Zhou Yunjun, et al. Study of raindrop influence of spectrum change on precipitation estimation[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(1): 220–230.]

[5] 王建恒, 陈瑞敏, 王国宁. 一次中小尺度强降水火箭增雨作业效果评估[J]. 气象科技, 2005, 33(增刊1): 82–86. [Wang Jianheng, Chen Ruimin, Wang Guoning. Effectiveness evaluation of a rocket precipitation enhancement operation during a severe small scale rainstorm[J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33 (Suppl.): 82–86.]

[6] 梅海霞, 郭文刚, 周林义, 等. 雨滴谱谱形参数对梅雨降水模拟能力的影响[J]. 气象, 2017, 43(1): 34–45. [Mei Haixia, Guo Wengang, Zhou Linyi, et al. Effect of shape parameter of raindrop spectrum on the simulation of Meiyu rainfall[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(1): 34–45.]

[7] Smith J A, Hui E, Steiner M, et al. Variability of rainfall rate and raindrop size distributions in heavy rain[J]. Water Resources Research, 2009, 45(4): 408–419.

[8] Maki M, Keenan T D, Sasaki Y, et al. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall lines observed in Darwin, Australia[J]. American Meteorological Society, 2001, 40 (8): 1393–1412.

[9] 赵城城, 张乐坚, 梁海河, 等. 北京山区和平原地区夏季雨滴谱特征分析[J]. 气象, 2021, 47(7): 830–842. [Zhao Chengcheng, Zhang Lejian, Liang Haihe, et al. Microphypical characteristics of the raindrop size distribution between mountain and plain areas over Beijing in summer[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(7): 830–842.]

[10] 柳臣中, 周筠珺, 谷娟, 等. 成都地区雨滴谱特征[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 112–121. [Liu Chenzhong, Zhou Yunjun, Gu Juan, et al. Characteristics of raindrop size distribution in Chengdu [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 112–121.]

[11] 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 899–911. [Li Shanshan, Wang Xiaofang, Wan Rong, et al. The characteristics of raindrop spectrum in different altitude region on the eastern slope of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 899–911.]

[12] 于建宇, 李茂善, 阴蜀城, 等. 青藏高原那曲地区云降水微观特征雨滴谱分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(2): 188–194. [Yu Jianyu, Li Maoshan, Yin Shucheng, et al. Analysis of

cloud precipitation microscopic characteristic raindrop spectrum in Nagqu area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, 35(2): 188−194.]

[13] 张玉欣, 韩辉邦, 郭世钰, 等. 祁连山南麓夏季不同降水云系雨滴谱特征及其 Z-R 关系[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1048−1057. [Zhang Yuxin, Han Huibang, Guo Shiyu, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution and its Z-R relationship for different precipitation clouds in summer in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1048−1057.]

[14] Chen B J, Yang J, Gao R Q, et al. Vertical variability of the raindrop size distribution in typhoons observed at the Shenzhen 356-m meteorological tower[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2020, 77(12): 1−59.

[15] 陈聪, 银燕, 陈宝君. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 388−395. [Chen Cong, Yin Yan, Chen Baojun. Raindrop size distribution at different altitudes in Mt. Huang[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(3): 388−395.]

[16] 王洪, 雷恒池, 杨洁帆. 微降水雷达测量精度分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(04): 392−404. [Wang Hong, Lei Hengchi, Yang Jiefan. Analysis of measurement accuracy of micro rain radar[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4): 392−404.]

[17] Rogers R R. An Extension of the Z-R Relation for Doppler Radar [C]//The 11th Weather Radar Confernce, 1964: 14−18.

[18] Hauser D, Amayenc P. A New method for deducing Hydrometeor-Size distributions and vertical air motions from doppler radar measurements at vertical incidence[J]. Journal of Applied Meterology, 1981, 20(5): 547−555.

[19] 汤达章, Richard E P. 垂直指向多卜勒雷达测量大气垂直运动和雨滴谱等物理量的方法[J]. 大气科学学报, 1985, 8(1): 36−46. [Tang Dazhang, Richard E P. A new method for inferring raindrop size distribution and vertical air motions from vertical incidence doppler measurements[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 1985, 8(1): 36−46.]

[20] 郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P和Gamma分布的对比研究[J]. 气象科学, 2007, 27(1): 17−25. [Zheng Jiaoheng, Chen Baojun. Comparative study of exponential and gamma functional fits to observed raindrop size distribution[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2007, 27(1): 17−25.]

[21] 崔云扬, 周毓荃, 蔡淼. 利用微雨雷达研究一次冷锋云系降水的垂直结构分布及演变特征[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 618−633. [Cui Yunyang, Zhou Yuquan, Cai Miao. Vertical structure and evolution of precipitation associated with clouds along a cold front based on micro rain radar observations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(3): 618−633.]

[22] 郭欣, 郭学良, 付丹红. 云凝结核浓度对不同弗罗德数下形成的地形云和降水的影响[J]. 气象学报, 2017, 75(2): 314−327. [Guo Xin, Guo Xueliang, Fu Danhong. Effects of CCN concentration on orographic clouds and precipitation formed with different Froude numbers[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(2): 314−327.]

[23] Peters G, Fischer B, Münster H, et al. Profiles of raindrop size distributions as retrieved by microrain radars[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(12): 1930−1949.

[24] 张玉欣, 韩辉邦, 康晓燕, 等. 三江源隆宝高寒湿地不同云系降水雨滴谱特征[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(1): 24−29. [Zhang Yuxin, Han Huibang, Kang Xiaoyan, et al. Characteristics of raindrop size distribution for different precipitation clouds in Longbao area of the Three-River source region[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022, 42(1): 24−29.]

[25] 宋灿, 周毓荃, 吴志会. 雨滴谱垂直演变特征的微雨雷达观测研究[J]. 应用气象学报, 2019, 30(4): 479−490. [Song Can, Zhou Yuquan, Wu Zhihui. Vertical profiles of raindrop size distribution observed by micro rain radar[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(4): 479−490.]

[26] 仝泽鹏, 杨莲梅, 曾勇, 等. 利用微雨雷达研究伊宁地区一次大雨过程的雨滴谱垂直演变特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 279−287. [Tong Zepeng, Yang Lianmei, Zeng Yong, et al. Vertical characteristics of raindrop size distribution during a heavy rain in Yining of Xinjiang based on micro-rain radar data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(2): 279−287.]

[27] 马思敏, 舒志亮, 常倬林, 等. 宁夏六盘山区地面雨滴谱特征统计分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1203−1214. [Ma Simin, Shu Zhiliang, Chang Zhuolin, et al. Statistics and analysis of surface raindrop spectrum characteristics in Liupan Mountain area of Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1203−1214.]

Vertical characteristics of raindrop size distribution in a precipitation process in a Three-River Source Region

GUO Shiyu[1,2], ZHANG Yuxin[1,2], HAN Huibang[1,2], ZHOU Wanfu[1,2],
KANG Xiaoyan[1,2], ZHANG Liyan[1,2]

(1. Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China;
2. Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: Based on data obtained from the Micro Rain Radar (MRR), OTT-PARSIVEL laser raindrop spectrometer, and Rain Gauge (RG) at Zeku Station, the applicability of the MRR in the plateau region was compared and examined for a precipitation weather process on September 17, 2021. The vertical variation characteristics of the MRR observation parameters and raindrop spectrum were investigated at different rain rates. Results show that the observed cumulative rainfall results of the MRR were consistent with those of the raindrop spectrometer and RG, and the MRR 200 m rain rate was highly associated with the raindrop spectrometer inversion value. At various levels of rainfall intensity, differences were found in the vertical distribution of precipitation parameters. Reflectivity, rain rate and liquid water content were affected by evaporation, and they fluctuated from high to low levels in the I stage of rain. The evaporation effect was weakened, and the peak height of each microphysical quantity was lower in the II stage of rain. The increase in particle diameter was due to the intensification of collision and coalescence, and the microphysical quantities increased with the decrease in height in the III stage of rain. Precipitation was dominated by small particles, and the raindrop number concentration contribution of small particles at each height layer was the largest. The contribution rate of 1000−4000 m small particles to the rain rate exceeded 90%, and the contribution rate of medium particles below 1000 m to the rain rate increased with the decrease of height. The contribution rate of large particles to the rain rate in the upper layer was greater than that in the lower layer.

Keywords: Three-River Source Region; micro rain radar; raindrop size distribution; vertical distribution